

В КУ можно было бы вместо воды использовать другой теплоноситель с более высокой температурой кипения. Этот теплоноситель нагревался бы в КУ, а затем в другом теплообменном аппарате мог бы передавать теплоту на нагрев воды и получения пара необходимых параметров. При этом можно было в широких пределах регулировать расход такого теплоносителя через КУ, не опасаясь вскипания или полного испарения в экономайзерных пучках.

Список использованных источников

1. Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология / А.М. Беленький, А.Н. Бурсин, Н.А. Коротченко, И.В. Корочанцева // Труды VII международной научно-практической конференции. – М.: МИСИС, 2014. – 485 с.
2. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебник / А.П. Баскаков, В.А. Мунц. – М.: ООО "ИД "БАСТЕТ", 2013. – 368 с.
3. Использование вторичных энергоресурсов / О.Л. Данилов, В.А. Мунц. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2008. – 154 с.

УДК 662.76

А. И. Смирнов, Т. Ф. Богатова, П. В. Осипов

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТИПА ТОПЛИВОПОДАЧИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПГУ–ВЦГ

Аннотация

В работе рассмотрены параметры, влияющие на эффективность работы газификатора, являющегося одним из основных элементов технологической схемы ПГУ–ВЦГ. Одним из факторов, определяющих экономичность данной технологии, является выбор способа подачи угля в газификатор. Рассмотрены варианты сухой топливоподачи с использованием в качестве транспортирующего газа N_2 , CO_2 и их смеси $N_2 + CO_2$, а также мокрой топливоподачи с использованием ВУС – суспензии на базе угля и воды, а также на базе угля и сжиженного CO_2 . Выявлены основные проблемы сухой и мокрой подачи топлива в газификатор. В статье приведены результаты сравнительного анализа ПГУ с внутрицикловой газификацией угля с разными способами топливоподачи.

Ключевые слова: ПГУ–ВЦГ, поточный газификатор, топливоподача, экономичность.

Abstract

The parameters influencing overall performance of the gasifier which is one of basic elements of the technological scheme of Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) are considered in paper. One of the factors defining profitability of this technology is the choice of a method of coal supply into the gasifier. Options of dry fuel feeding with use as the carrier gas N_2 , CO_2 and their mix $N_2 + CO_2$ and also wet fuel feeding about use of CWS – suspension on the basis of coal and water and also on the basis of coal and the liquefied CO_2 are considered. The main problems of dry and

wet fuel supply into the gasifier are revealed. Results of the comparative analysis of the IGCC with different ways of fuel feeding into the gasifier are given in article.

Key words: *IGCC, entrained-flow gasifier, fuel supply, efficiency*

Для подачи топлива в газификатор применяется два основных способа подачи – мокрый с подачей угольной пыли в смеси с водой в виде водоугольной суспензии (ВУС) и сухой с использованием в качестве транспортирующего агента азота. Поточные газификаторы с мокрой топливоподачей являются наиболее компактными, так как подача топлива в виде ВУС возможна при высоких давлениях в реакторе (до 10 МПа), что позволяет уменьшить объемные расходы рабочего тела и габариты газификатора и вспомогательных систем. Но при этом калорийность получаемого синтез-газа на 15–30 % ниже, чем при сухой подаче топлива, а химический КПД составляет 70–76 %. Применение сухой подачи топлива в газификатор позволяет увеличить химический КПД на 4,5–10 %, снизить потребление кислорода на 20–25 %, расширить возможности использования низкосортных углей [1]. Однако максимальное давление в газификаторе с сухой подачей ограничивается уровнем в 4–6 МПа. Это связано с проблемой подачи (вдува) мелкодисперсного топлива в реактор высокого давления.

Система сухой топливоподачи

В поточном газификаторе состав синтез-газа зависит, в основном, от 1) типа угля; 2) термодинамических условий в реакторе; 3) системы подачи угля. Но если первые два фактора оказывают сильное влияние на газификационный процесс, влияние транспортирующего уголь агента не столь очевидно, оно зависит от нескольких характеристик, например, сухая или мокрая топливоподача, реакционная способность транспортирующего агента и т.д. В коммерческих газификаторах (*Shell, Siemens, MHI*, и т.д.) для подачи угля используется азот, полученный в воздухоразделительной установке (ВРУ). Будучи инертным газом, азот не оказывает влияние на процесс, за исключением выполнения им функции теплоотвода. С другой стороны, использование CO_2 для подачи угля в газификатор может быть предпочтительнее. В отличие от азота CO_2 не является инертным, он оказывает влияние на кинетику многих реакций [2]. Кроме того, в зависимости от конечного использования синтез-газа, CO_2 может способствовать достижению необходимого отношения H_2/CO или ограничить количество инертных газов в получаемом синтез-газе (обычно это азот и аргон).

Система сухой топливоподачи представляет собой простую и достаточно надежную технологию, широко используемую для подачи твердых веществ в реакторы под давлением. Однако возможны проблемы при работе шлюзовой системы подачи топлива в газификатор, так как возможен выброс CO_2 в процессе подачи. Это требует совершенствования системы топливоподачи. На рис. 1 показаны три различные конфигурации для системы сухой подачи угля:

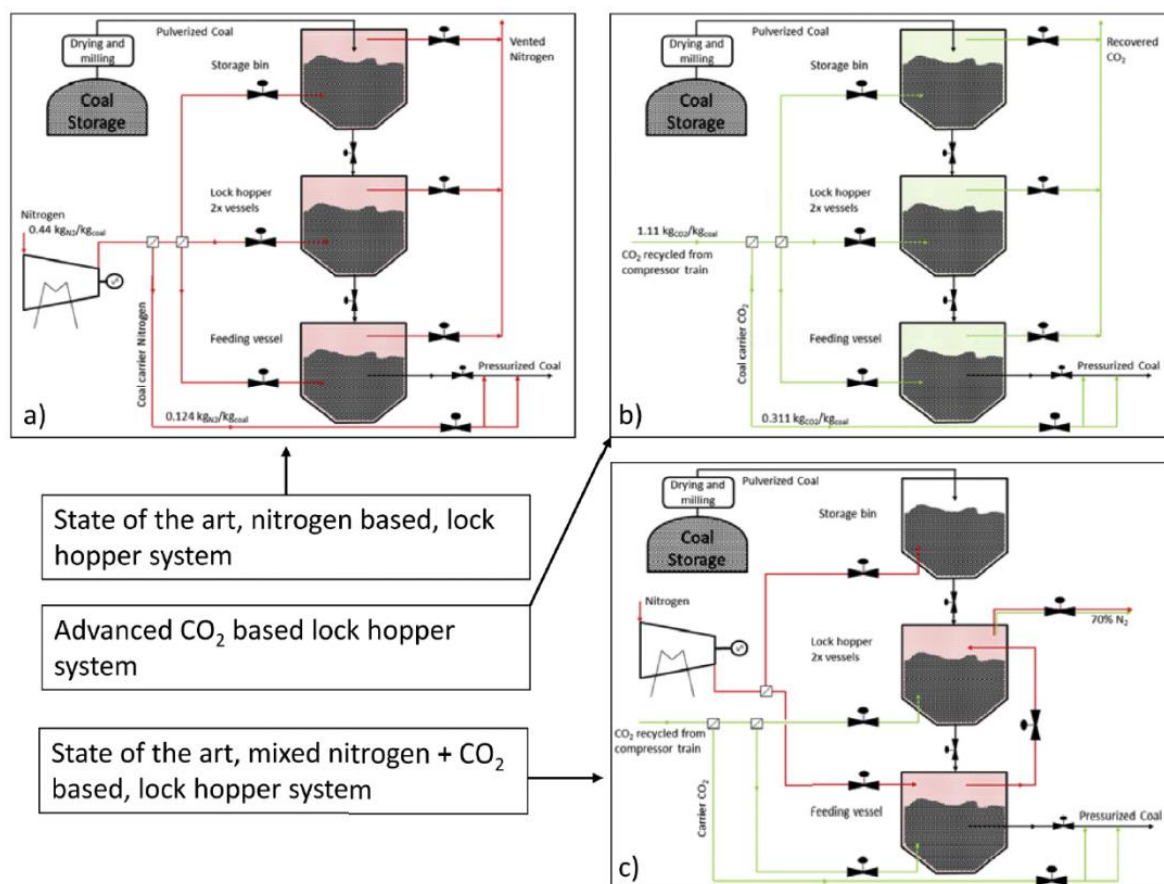


Рис. 1. Системы подачи угля в газификатор:

a – на основе N₂; *б* – на основе CO₂; *в* – гибридная на основе смеси CO₂ и N₂ [3]

– традиционная схема на основе азота: часть азота из ВРУ сжимается и используется для создания давления в трех разных реакторах: в бункере для хранения угля, в шлюзовой системе и в питательном бункере, а другая часть – непосредственно для транспортирования угля в газификатор. В целом, требуется около 0,44 кг азота на каждый кг угля;

– усовершенствованная система на основе CO₂: в этом случае схема аналогична схеме на основе азота, только подача угля осуществляется CO₂ и количество газа, необходимого для транспортировки угля, меняется (объемный расход почти одинаков, но массовый расход различен). Для возврата CO₂ в цикл, чтобы использовать его для повышения давления в установке, должны быть сделаны различные модификации. Дополнительный компрессор не требуется, так как CO₂ поступает из установки сжижения газа после разделения;

– современная система азот + CO₂: согласно [3], для уменьшения количества азота, подаваемого в газификатор, можно использовать смесь N₂ + CO₂. При этом только часть CO₂ выделяется вместе с азотом из шлюзовой системы.

В случае подачи угля азотом качество синтез-газа снижается из-за увеличения инертной части, рис. 2

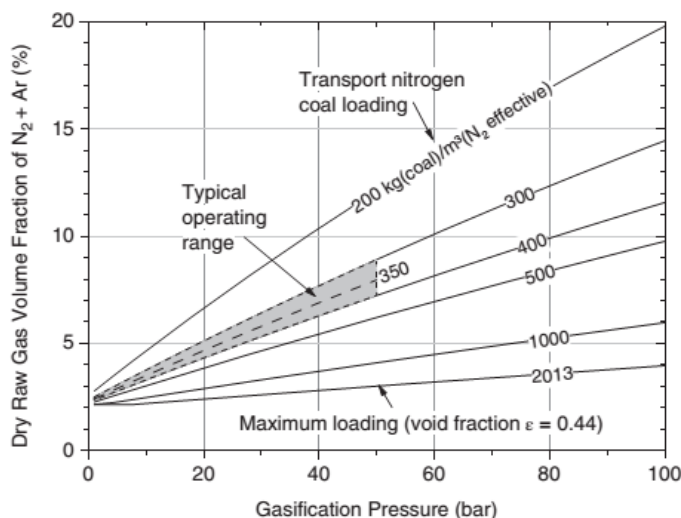


Рис. 2. Доля инертных газов в неочищенном газе в зависимости от давления газификатора и количества угля в транспортирующем его азоте

синтез-газа обычным методом (например, *Rectisol*). Следовательно, это позиционируется как отсутствие балласта для последующих процессов. Другое преимущество системы подачи угля с помощью CO_2 – улучшенная конверсия угля благодаря реакции *Boudouard*. Это обеспечивает более высокое содержание CO в получаемом синтез-газе, что обеспечивает необходимое соотношение H_2/CO [4]. Используемый в качестве транспортирующего газа CO_2 имеет параметры 80°C и $4,8\text{ МПа}$.

В гибридной схеме с использованием в качестве транспортирующего газа

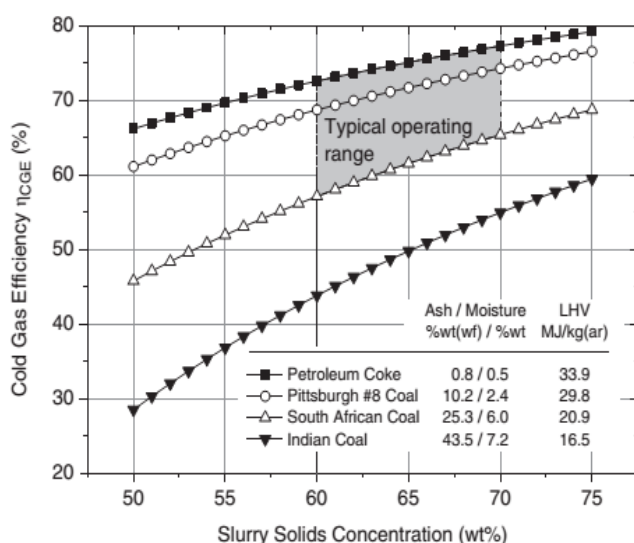


Рис. 3. Влияние концентрации твердых частиц в ВУС на химический КПД для различных типов топлив

смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, особых отличий нет, при этом достигается более высокая степень улавливания – более чем на 3% выше, чем в случае транспортировки угля азотом. В [5] приведены расходы N_2 и CO_2 – $0,444\text{ кг N}_2/\text{кг угля}$ и $0,234\text{ кг CO}_2/\text{кг угля}$.

Главным преимуществом CO_2 является то, что он может быть легко удален из

Система гидравлической подачи топлива

Система гидравлической подачи угля основана на использовании водо-угольной суспензии (ВУС), которая может быть успешно подана с помощью насосов, работающих при давлениях $7,0\text{--}10,0\text{ МПа}$.

Помимо вязкости ВУС и устойчивости ее к расслоению важной характеристикой суспензии является концентрация твердых частиц. На рис. 3 показано влияние концентрации твердых частиц суспензии на химический КПД для нескольких видов твердых топлив [4]. График получен для модели газификатора *GE* с радиационным и конвективным охладителем синтез-газа, с рециркуляцией непрореагировавшего углерода. Температура газификации 1450 °С, давление 3,0 МПа, ВУС предварительно нагревали до 120°С.

Следует отметить, из-за высокого содержания внутренней влаги низкосортные угли вообще не подходят для подачи в виде ВУС. Кроме того, низшая теплота сгорания ВУС на базе низкосортных углей может оказаться недопустимо низкой. Следовательно, на практике подача в виде ВУС возможна только для нефтяного кокса или малозольных битуминозных углей.

Применение в поточных газификаторах сухой топливоподачи обеспечивает более высокие степень конверсии (99–99,5 %), химический КПД (78–82 %), Q_r^i получаемого синтез-газа (10,5–11,5 МДж/м³) [1]. Результаты моделирования в *Aspen Plus* [6] ПГУ–ВЦГ с поточными газификаторами *Shell* и *GE (Texaco)*, приведенные в таблицу, показывают, что ПГУ с газификаторами типа *Shell* с сухой топливоподачей имеют более высокий КПД.

Таблица

Сравнение характеристик ПГУ–ВЦГ с газификаторами *Shell* и *Texaco*
(состав угля $C_r = 37,3$ %, $A_r = 13,3$ %, $W_r = 18,6$ %, $V_r = 30,8$ %)

| Характеристика | <i>Shell</i> | <i>GE (Texaco)</i> |
|---|--------------|--------------------|
| Тип топливоподачи | сухая | в виде ВУС |
| Температура газификации, °С | 1800–2000 | 1250–1550 |
| Давление, МПа | 3,0 | 4,1 |
| Состав синтез-газа (CO+H ₂) | 92,6 | 84,4 |
| Теплота сгорания синтез-газа Q_r^i , МДж/м ³ | 11,03 | 8,81 |
| Мощность $N_{бр}/N_{нетто}$, МВт | 321,3/273,4 | 333,3/287 |
| КПД ПГУ–ВЦГ нетто, % | 42,22 | 40,83 |

В качестве перспективного способа, известного как *Phase Inversion-based Coal-CO₂ Slurry (PHICCOS)*, в настоящее время рассматривается подача топлива в виде суспензии уголь-СО₂ [2]. Ключевым моментом этого способа является приготовление уголь-углекислотной суспензии через стадию приготовления обычной ВУС. Затем ВУС смешивается с жидким СО₂, обладающим гидрофобными свойствами, который адсорбируется на поверхности углеродсодержащих частиц, вытесняя воду. Это давно известное явление избирательной концентрации или гидрофобного замещения традиционно изучалось для обеззоливания и осушения углей. В результате взаимодействия СО₂ и угольных частиц происходит инверсия (разделение) фаз: малозольные гидрофобные угольные частицы концентрируются в более легкой фазе СО₂, тогда как высокозольные гидрофильные частицы аккумулируются в водной фазе. Эти две фазы могут непрерывно отводиться соответственно из верхней и нижней частей смесительной/осадочной камеры. Такое обогащение топлива за счет снижения его зольности и влажности

в результате инверсии фаз является преимуществом данного способа приготовления суспензии уголь- CO_2 .

Список использованных источников

1. Развитие поточных газификационных технологий в Азиатско-Тихоокеанском регионе (обзор) / А.Ф. Рыжков, Т.Ф. Богатова, Цзэн Линьянь, П.В. Осипов // Теплоэнергетика. 2016. № 11. С. 40-50.
2. The Phase Inversion-based Coal- CO_2 Slurry (PHICCOS) feeding system: Technoeconomic assessment using coupled multiscale analysis / C. Botero, R. P. Field, H. J. Herzog, A. F. Ghoniem // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013. №18. P. 150-164.
3. Schinignit M., Tietze G. Combined use of carbon dioxide and nitrogen in a component of a powder injection system for use in pulverized coal gasification under pressure. 2008.
4. Grabner M. Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High-Ash Coal. John Wiley and Sons (WILEY). 2014. – 365 с.
5. . Techno-economic assessment of two novel feeding systems or a dry-feed gasifier in an IGCC plant with Pd-membranes for CO_2 capture / M. Gazzania, D. M. Turi, A. F. Ghoniemb, E. Macchia, G. Manzolin // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2014. V. 25. P. 62-78.
6. Zheng L., Furinsky E. Comparison of Shell, Texaco, BGL and KRW gasifiers as part of IGCC plant computer simulations // Energy Conversion and Management. 2005. № 46. P. 114-120.

УДК 662.76

Д. К. Смирнов, Т. Ф. Богатова

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ ОТКРЫТОГО И ЗАМКНУТОГО ЦИКЛОВ

Аннотация

В работе рассмотрены газотурбинные установки открытого и замкнутого циклов. Проанализированы достоинства и недостатки таких ГТУ. Показано, что в ГТУ замкнутого цикла возможно использование более широкого диапазона топлив, включая твердое топливо и низкосортное жидкое топливо. Приведены данные по источникам тепла в газотурбинных установках замкнутого цикла, в качестве которых могут использоваться органическое топливо, ядерное топливо, биомасса, концентрированная солнечная энергия, теплота отходящих газов. Выбор рабочего тела для ГТУ замкнутого цикла в значительной мере определяет конструкцию, габариты и эксплуатационные характеристики установки. Рассмотрена возможность применения в качестве рабочего тела помимо воздуха и азота также гелия и CO_2 .

Ключевые слова: ГТУ открытого цикла, ГТУ замкнутого цикла, рабочая жидкость, топливо.